

обеспечивают более высокий уровень грибостойкости и снижают риск интоксикации человека спорами, насыщенными металлическими частицами.

### Литература

1. Бондарева, Т.П. Разработка ткани с экранирующим эффектом и исследование её свойств / Т.П. Бондарева, Е.Г. Замостоцкий, В.В. Невских // Вест. Витебс. госуд. техн. ун-та . – 2013. – № 25. – С. 13 – 18.
2. Антистатические свойства тканей для технологической одежды и электро-статическая безопасность чистых производственных помещений / В.И. Власенко [и др.] // Фармацевтическая отрасль. – 2010. – № 6 (23). – С. 78 – 81.
3. Joshi M., Bhattacharyya A. Nanotechnology: a new route to high performance and functional textiles // Textile Progress. – 2011. – 43 (3). – P. 155 – 233.

**УДК 620.172:620.178**

## **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕЧНЫХ ЗМЕЕВИКОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ АУСТЕНИТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

**А.В. Крыленко**

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

*Рассмотрены факторы, вызывающие образование трещин в сварных соединениях печных змеевиков, выполненных аустенитными электродами.*

Сварка трубных элементов печных змеевиков из хромомолибденовой стали 15X5М осуществляется по перлитному или аустенитному вариантам. При перлитном варианте сварки электродами типа Э-10X5М (с предварительным подогревом кромок и последующей термообработкой стыков) металл шва идентичен основному металлу. Однако соблюдение режимов подогрева и термообработки перлитных сварных стыков в условиях монтажа и ремонта печного оборудования на открытой площадке весьма затруднено, а уже незначительное отклонение от оптимальной технологии сварки, как правило, приводит к появлению холодных трещин в сварных соединениях.

Применение для сварки хромомолибденовых сталей электродов аустенитного класса гарантирует отсутствие холодных трещин и исключает необходимость в термообработке, что значительно упрощает и ускоряет монтаж и ремонт, но в этом случае в электрохимическом отношении шов резко отличается от основного металла и поведение такого сварного стыка при длительной эксплуатации нуждается в тщательной проверке.

Наиболее вероятным и опасным видом разрушения аустенитных сварных соединений стали 15Х5М печных змеевиков является образование после длительной эксплуатации (10...15 лет) трещин как по линии сплавления сварного шва с основным металлом, так и по зоне термического влияния сварного шва. Насколько велика такая опасность и при каких условиях она практически реализуется для печного оборудования – эти вопросы – предмет исследования автора.

Выполнены исследования структуры и свойств контрольных участков труб 11-ти печных змеевиков из стали 15Х5М, которые включали металлографический анализ и механические испытания образцов сварных соединений, выполненных аустенитными электродами типа Э-10Х25Н13Г2.

По результатам металлографического анализа выявлено, что по сечению сварных соединений имеется структурная неоднородность, которая приводит к снижению их работоспособности при эксплуатации.

Со стороны стали 15Х5М (основной металл), являющейся в рассматриваемом соединении менее легированной сталью, структурную неоднородность составляет светлотравящаяся полоска шириной 60...80 мкм со структурой, имеющей меньшее количество карбидных соединений по сравнению с остальной частью этой стали, имеющей в зоне термического влияния сфероидизированные карбиды, а в основном металле – структуру феррита с равномерно распределенными в нем частицами карбидов.

Со стороны высоколегированного аустенитного сварного шва (состава типа Э-10Х25Н13Г2) структурную неоднородность составляет светлотравящийся участок шириной 110...120 мкм с наличием скоплений мелкодисперсных карбидов как в виде узких полосок, так и в виде отдельных точек. При этом непосредственно у границы линии сплавления прослойка карбидов представляет собой черную полоску, свидетельствующую о скоплении здесь большого количества выделившейся карбидной фазы.

Механические свойства основного металла сварных соединений (сталь 15Х5М) соответствуют требуемым значениям. Механические свойства самих сварных соединений ниже требуемых значений, что свидетельствует о разупрочнении и снижении пластичности материала сварных соединений при эксплуатации. Значения твердости *HВ* основного металла и сварного шва соответствуют требованиям. Значения твердости *HВ* зоны термического влияния выше допустимого значения, что свидетельствует о чрезмерной твердости и, как следствие, низкой пластичности и склонности к хрупкому разрушению материала зоны термического влияния сварных соединений.

Основными причинами, приводящими к повреждению разнородных сварных соединений (в рассматриваемом случае сварное соединение стали 15Х5М, выполненное аустенитными электродами типа Э-10Х25Н13Г2), являются: диффузия углерода вдоль поверхности сплавления сварного шва

и термические напряжения, возникающие в сварном соединении как при сварке, так и при эксплуатации вследствие различных коэффициентов теплового расширения основного металла и сварного шва.

Так, коэффициент линейного теплового расширения для стали 15X5M в интервале температуры 20...500 °С составляет  $12,3 \times 10^{-6}$  (°С<sup>-1</sup>); для сварного шва состава типа Э-10Х25Н13Г2 коэффициент линейного теплового расширения в интервале температуры 20...500 °С составляет  $\approx 17,5 \times 10^{-6}$  (°С<sup>-1</sup>), т.е. коэффициент линейного теплового расширения сварного шва в 1,4 раза (на 40 %) больше коэффициента линейного теплового расширения основного металла.

Разница в содержании карбидообразующих элементов с обеих сторон от линии сплавления сварного шва приводит к градиенту химического потенциала углерода вдоль поверхности сплавления сварного шва. Поэтому при длительной эксплуатации змеевика при высокой температуре неизбежно протекание диффузии (перемещения) углерода из основного металла (сталь 15X5M) с малым содержанием карбидообразующего элемента (хром) в металл сварного шва (состава типа Э-10Х25Н13Г2), богатый карбидообразующим элементом (хромом). В результате этого в околошовной зоне сварного шва со стороны основного металла возникает зона с относительно низким содержанием углерода (т.е. обезуглероженная зона), а со стороны аустенитного сварного шва – участок с высоким содержанием карбидов вблизи линии сплавления, имеющий склонность к хрупкому разрушению (рис.).

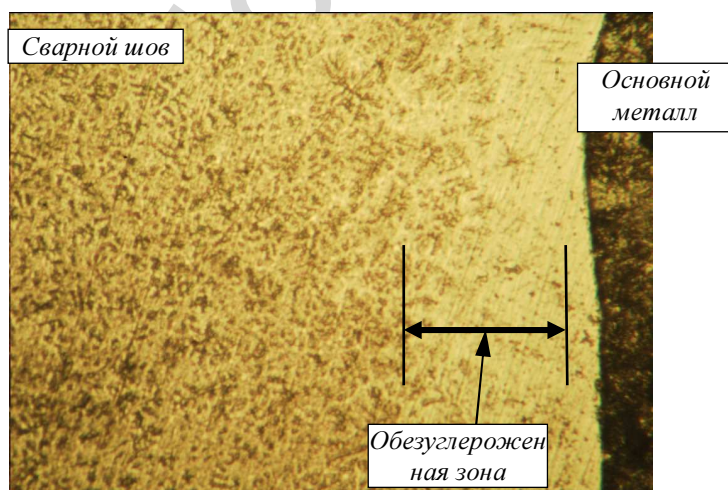


Рис. Микроструктура участка сварного соединения ( $\times 500$ )

Поэтому в подобном разнородном сварном соединении, имеющем структурную неоднородность, различные значения твердости вдоль поверхности сварного соединения, а также различные коэффициенты теплового расширения основного металла и сварного шва в течение длительной эксплуатации при высокой температуре, а также наличии циклических условий

нагрева и охлаждения (при пуске и остановке технологической установки) возникают существенные эксплуатационные напряжения.

Изменение поля напряжений при переходе от одного участка сварного соединения к другому обусловлено изменением свойств этих участков и их способностью к пластической деформации. Это приводит к появлению напряжений различного уровня на соседних участках сварного соединения, т.е. возникает концентрация напряжений в локальных участках материала. При превышении концентрации напряжений предельного значения возможно образование трещины в сварном соединении.

Таким образом, сварные соединения стали 15Х5М, выполненные аустенитными электродами, не обеспечивают работоспособность печных змеевиков после эксплуатации более 10 лет.

УДК 621.793

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

В.А. Кукареко<sup>1</sup>, А.Н. Григорчик<sup>1</sup>, М.А. Белоцерковский<sup>1</sup>, Н.Н. Попок<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

<sup>2</sup> Полоцкий государственный университет, Полоцк

*Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические характеристики гиперзвуковых газотермических покрытий, выполненных из высокохромистых проволочных сталей 40Х13, 95Х18 и 06Х19Н9Т. Показано, что увеличение содержания углерода и хрома в напыляемых сталях приводит к снижению твердости покрытий. Установлено, что газотермическое покрытие из стали 95Х18 вследствие распада метастабильного аустенита при трении обладает повышенной износостойкостью по сравнению с покрытиями из сталей 40Х13 и 06Х19Н9Т.*

**Введение.** Гиперзвуковая металлизация является высокопроизводительным и экономичным методом получения газотермических покрытий. К отличительным особенностям гиперзвукового напыления можно отнести: высокую скорость напыления, низкую пористость получаемых покрытий (~ 2 – 5 %) и высокий коэффициент использования напыляемого материала (0,85).

Вместе с тем, до настоящего времени отсутствуют систематизированные данные о триботехнических характеристиках гиперзвуковых газотермических покрытий из высокохромистых проволочных сталей. В связи с этим задачей настоящей работы являлось сравнительное исследование трибомеханических характеристик покрытий из высокохромистых сталей 40Х13, 95Х18 и 06Х19Н9Т.